

지뢰제거를 위한 로봇 텔레오퍼레이션 기술 연구

A Study on the Robot Teleoperation for Mine Removal

임수철* 유삼현*
Lim, Soo-Chul Yoo, Sam-Hyeon

ABSTRACT

Future Combat System(FCS), such as unmanned systems that reduce the danger faced by soldiers in the field, are likely to be studied and developed. Soldiers when finding and disposing of mines risk injury and death. Several methods of safe mine retrieval are investigated. In this paper, a mine removal method, which uses a remote controlled robot to get rid of mines using a 4 channel architecture teleoperation method is used. The robot, when in contact with soil and mines, is controlled by a remote control. The feasibility of using teleoperation controlled system to remove mines is demonstrated in this paper. The Matlab-Simulink was used as a tool to simulate mine removal with robots. The force and position of the robot(slave system of 4 channel architecture) and controller(master system of 4 channel architecture) are analyzed when users handle the controller with sinusoidal force.

주요기술용어(주제어) : Teleoperation(원격제어), Mine Removal(지뢰제거)

1. 머리말

초기 로봇 텔레오퍼레이션(Teleoperation) 기술은 원자력 발전소 내부에 위치한 로봇을 원격으로 조종하여 작업을 수행시킴으로써 사람이 위험에 노출되는 것을 방지하기 위한 기술이었다. 이는 1964년 Goertz와 Thompson^[1]에 의해 최초로 제안되었으며, 그 후 많은 분야에서 이 기술을 응용하여 왔다. 텔레오퍼레이션 기술은 원격 수술로봇제어^[2], 해저 로봇^[3], 우주 탐사 로봇 제어^[4], 미세 조작^[5] 등과 같이 사람이 접근하기 힘든 공간적 제약을 극복하기 위한 분야에 주로

사용되었다.

이 기술은 사용자가 로봇 팔 움직임을 조종자의 움직임과 같은 움직임 또는 증폭, 감소시킨 움직임을 생성시킴에 따라 로봇의 위치를 제어할 수 있게 되며, 이와 동시에 사용자가 로봇이 받는 힘을 동일하거나, 증폭 또는 감소된 상태로 느낄 수 있게 된다.

텔레오퍼레이션 기법은 80년대 후반 hanaford^[6]에 의해 2-port network의 개념을 도입시켜 시스템의 성능평가와 안정성을 분석하였으며, Yokokohji^[7]가 작업 환경에서 작업자가 얼마나 실제와 같이 느끼는 지표인 투명도(transparency)의 정의와 변형된 양방향 제어(bilateral control) 구조가 제안되었다. 또한 Zaad^[8]는 슬레이브와 작업환경사이에 상호 작용력 측정문제 해결을 위해 적응제어(Adaptive control)를 적용시켰다. 최근에 이러한 기술을 실제 시스템에 적용하면서

† 2008년 7월 3일 접수~2008년 11월 14일 게재승인

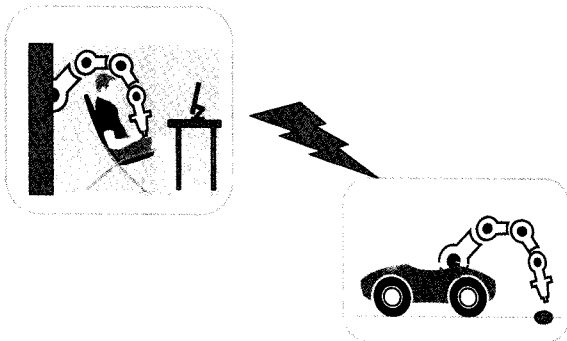
* 육군사관학교(KMA) 무기·기계공학과

주저자 이메일 : limsc@kma.ac.kr

안전성 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 그 대표적인 예가 패시비티 기법을 이용한 안정성 확보^[9]이다.

미래 전투 체계(FCS)하에서 무인화 시스템이 광범위하게 적용될 것은 자명하며 특히 감시정찰, 경계, 지뢰지대 개척, 수송, 경중전투 등과 같은 다양한 분야에서 원격제어 기술을 이용한 로봇의 활용이 극대화 될 것으로 예측된다. 로봇을 이용한 무인화 시스템은 지뢰제거, 통로개척 등과 같이 위험요소가 많은 작전수행 시 주로 활용됨으로써 인명피해를 최소화시킬 수 있다는 장점을 갖고 있다.

그림 1에서 로봇을 원격 조종하여 지뢰를 제거하는 과정을 보여 주고 있다. 사용자가 원격으로 로봇 팔의 영상 및 촉감정보를 실제 로봇에서 전달 받아, 이 정보를 이용하여 로봇 팔을 조종함으로써 지뢰를 제거할 수 있게 된다. 본 연구에서는 마스터 장치를 이용한 로봇 텔레오퍼레이션 기술을 적용할 경우, 실제 원격 지뢰제거시 필수적인 요소인 힘 반향이 가능한지 여부를 시뮬레이션 결과를 통해 분석한다.

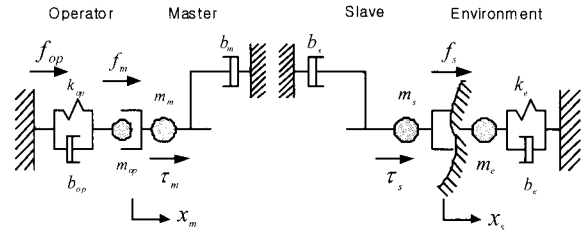


[그림 1] 텔레오퍼레이션 기술에 의한 지뢰 제거 개념도

2. 텔레오퍼레이션 기술 및 모델링

텔레오퍼레이션 기술을 적용하기 위한 구성은 사용자(operator)가 조종기(master)를 조작하는 부분과 원격에서 슬레이브에 해당하는 로봇이 작업대상(Environment)에 직접 작업 하는 부분으로 나누어진다. 그림 2는 사용자가 로봇을 원격으로 조종시, 조

종기와 사용자를 포함한 조종하는 부분과 로봇이 작업하는 부분을 모델링 한 것이다^[6].



[그림 2] 조종기 팔과 로봇 팔의 모델링^[6]

$$m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m = \tau_m + f_m \quad (1)$$

$$m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s = \tau_s - f_s \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 각각 조종기와 로봇 부분에서의 운동방정식(equation of motion)이며 하첨자 m 은 조종기 부분에서의 특성을 s 는 로봇에서의 특성을 의미한다. 여기서 f_m 은 사용자가 조종기에 가하는 힘을, f_s 는 로봇 팔이 작업 대상에 가해지는 힘을 나타내며 τ_m 과 τ_s 는 각각 조종기 부분과 로봇 팔 부분에서의 입력이다. τ_m 과 τ_s 는 각각 식 (3) 및 (4)와 같이 유도된다.

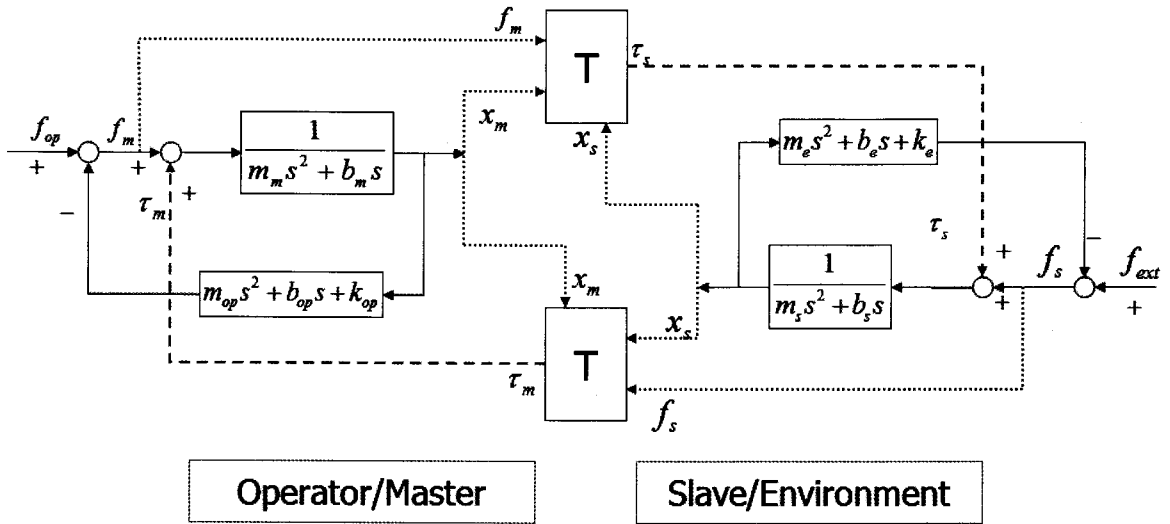
$$f_s = m_e \ddot{x}_s + b_e \dot{x}_s + k_e x_s \quad (3)$$

$$f_{op} - f_m = m_{op} \ddot{x}_m + b_{op} \dot{x}_m + k_{op} x_m \quad (4)$$

그림 3은 조종기 부분과 로봇 부분에서 생성되는 위치와 힘을 각각 로봇 부분과 조종기 부분으로 전달해 주는 프로세스에 대한 블록 다이어그램이다. 그림 3에서와 같이 조종기에서 생성되는 힘과 위치 정보가 로봇으로 전달되어지게 되고 로봇에서 생성되는 힘과 위치 정보를 다시 조종기로 전달해주게 된다.

이와 같이 피드백 되어져서 나온 값들을 이용한 제어에 적용되는 운동방정식은 식 (5), (6)과 같다^[6].

$$\tau_m = \begin{bmatrix} K_{mpm} + K'_{mpm} \frac{d}{dt} + K''_{mpm} \frac{d^2}{dt^2} & K_{mfms} \\ - \left[K_{mfs} + K'_{mfs} \frac{d}{dt} + K''_{mfs} \frac{d^2}{dt^2} \right] & K_{mfs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} \quad (5)$$



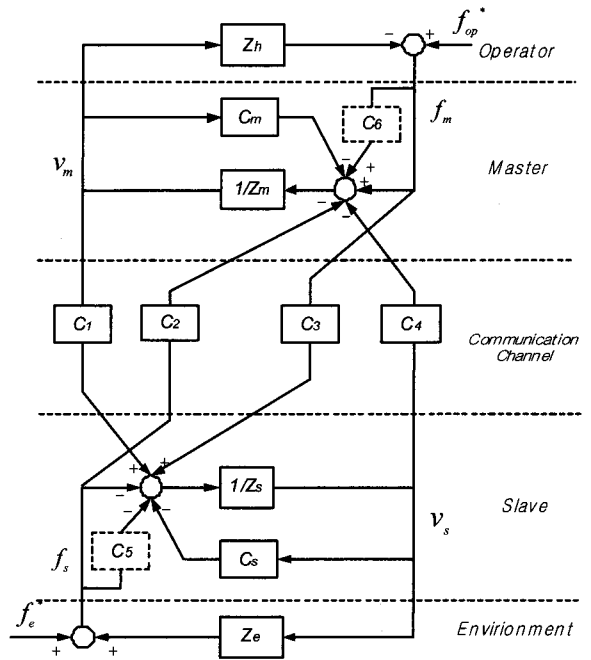
[그림 3] 텔레오퍼레이션 블록다이아그램

$$\tau_s = \left[K_{spm} + K'_{spm} \frac{d}{dt} + K''_{spm} \frac{d^2}{dt^2} \right] K_{sfm} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} - \left[K_{sps} + K'_{sps} \frac{d}{dt} + K''_{sps} \frac{d^2}{dt^2} \right] K_{sfs} \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (5), (6)에서 $K_{mpm}, K'_{mpm}, K''_{mpm}, K_{mfpm}$ 은 사람이 조종기를 움직일 때 생성되는 입력 τ_m 에 의해 생성되는 조종기의 위치, 속도, 가속도, 힘의 피드백 게인이며, $K_{mps}, K'_{mps}, K''_{mps}, K_{mfs}$ 은 입력 τ_m 에 의해 생성되는 로봇팔의 위치, 속도, 가속도, 힘의 피드백 게인을 나타내는 것이다. $K_{mpm}, K'_{mpm}, K''_{mpm}, K_{mfpm}$ 은 사람이 조종기를 움직일 때 생성되는 입력 τ_m 에 의해 생성되는 조종기의 위치, 속도, 가속도, 힘의 피드백 게인이다. $K_{spm}, K'_{spm}, K''_{spm}, K_{sfm}$ 은 입력 τ_s 에 의해 생성되는 조종기의 위치, 속도, 가속도, 힘의 피드백 게인이다. $K_{sps}, K'_{sps}, K''_{sps}, K_{sfs}$ 은 입력 τ_s 에 의해 생성되는 조종기의 위치, 속도, 가속도, 힘의 피드백 게인이다.

그림 4는 식 (5), (6)을 간략화 하여 블록 다이어그램으로 나타낸 것이다^[6,10].

그림 4에서 Z_h 는 사람이 조종기를 잡고 있을 때 사람의 임피던스(impedance), Z_m 은 조종기의 임피던스, Z_s 는 로봇의 임피던스, Z_e 는 로봇이 접촉하는 작업환



[그림 4] 텔레오퍼레이션 제어 블록 다이어그램^[6,10]

경의 물성치이다. 또한 C_1 은 사용자의 속도정보를 피드백 해서 제어하는 요소인 $K_{mps}, K'_{mps}, K''_{mps}$ 로, C_2 는 로봇의 힘을 사용자에게 피드백 해서 제어하는 요소인 K_{sfm} 로, C_3 은 사용자의 힘이 로봇에 피드백 되어

제어하는 요소인 K_{mfs} 으로 구성되며, C_4 는 로봇의 속도 정보를 조종기에 피드백 제어하는 요소이다. 지뢰 제거 작업에 있어서, Z_e 는 크게 로봇이 땅을 접촉하는 부분과 로봇이 지뢰를 접촉하는 부분으로 나뉘게 된다. 3장에서는 이런 두 가지 부분에 로봇이 접촉했을 때 조종기의 입력이 로봇의 움직임에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 알아본다.

3. 시뮬레이션 및 분석

로봇 텔레오퍼레이션 기술을 이용한 지뢰제거 작업에 적용 가능한지 여부를 MATLAB-simulink 이용하여 시뮬레이션 하고 조종기와 로봇팔에서의 변위와 힘을 측정하였다. 표 1은 토지의 물성치, 지뢰의 물성치, 로봇과 조종기의 물성치 및 사람 손의 물성치^[10]를 나타내고 있다. 이때 슬레이브와 마스터는 비슷한 장치를 사용한다고 가정한다. 두 장치는 비슷한 장치지만 실제 장치 개발 시 발생하는 오차를 물성치 값에 적용하여 시뮬레이션 하였다.

[표 1] 물성치

구분	질량 (kg)	스프링 (N/m)	댐핑계수 (Ns/m)
로봇	3.1	14	0.1
조종기	3	10	0.3
일반 구조장애물	-	3×10^6	-
지뢰	0.5	1000	30
사람의 손	.1	3.75	6.12

표 1의 물성치를 이용하여, 지뢰 제거 시 10N의 힘을 가지는 1Hz, 10Hz의 Sine 입력을 이용하여 텔레오퍼레이션을 한다고 가정하여 시뮬레이션 하였으며, 이때 C_3, C_4 는 1, C_1, C_4 는 P 게인 값을 5, I 게인 값을 10, C_s, C_m 에서는 P 게인값을 5, I 게인값을 1, D 게인 값을 10으로 하여 제어하였다. 이 때 나타나는 움직임과 힘의 관계를 그림 4의 텔레오퍼레이션 기술을 이용한 시뮬레이션을 통해 효용성을 알아본다.

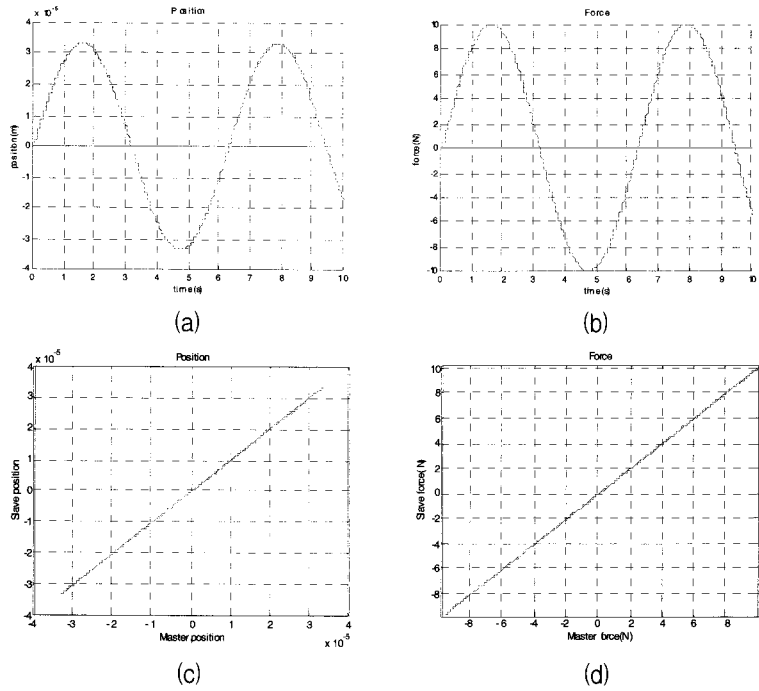
그림 5부터 그림 8까지는 사용자가 조종기를 10N의 힘을 가지고 1Hz와 10Hz의 Sine파를 입력으로 원격으로 로봇을 조종하여 로봇팔이 토지 및 지뢰에 닿았을 경우의 시뮬레이션 한 결과를 그래프로 보여주고 있다. 각 그림에서 (a)는 조종 시 조종기와 로봇의 변위 및 변위차를 나타내고 (b)는 조종기와 로봇에서 받는 힘과 두 힘의 차이를 나타낸다. (c)에서 조종기와 로봇의 변위를 보여주는 그래프로써 x축은 조종기의 변위 값을 y축이 로봇의 변위 값을 보여주고 있다 (d)는 조종기와 로봇에서 받는 힘의 변화이며 x 축은 조종기에서의 힘, y축은 로봇에서의 힘을 나타낸다.

그림 5와 그림 6은 각각 10N의 크기를 갖는 1Hz 및 10Hz의 정현파를 조종기에서 입력하여 로봇 팔이 땅에 접촉했을 때, 그림 7과 그림 8은 각각 10N의 크기를 갖는 1Hz 및 10Hz의 정현파를 조종기에서 입력하여 로봇 팔이 지뢰에 접촉했을 때 조종기와 로봇의 힘과 변위를 시뮬레이션 한 결과이다.

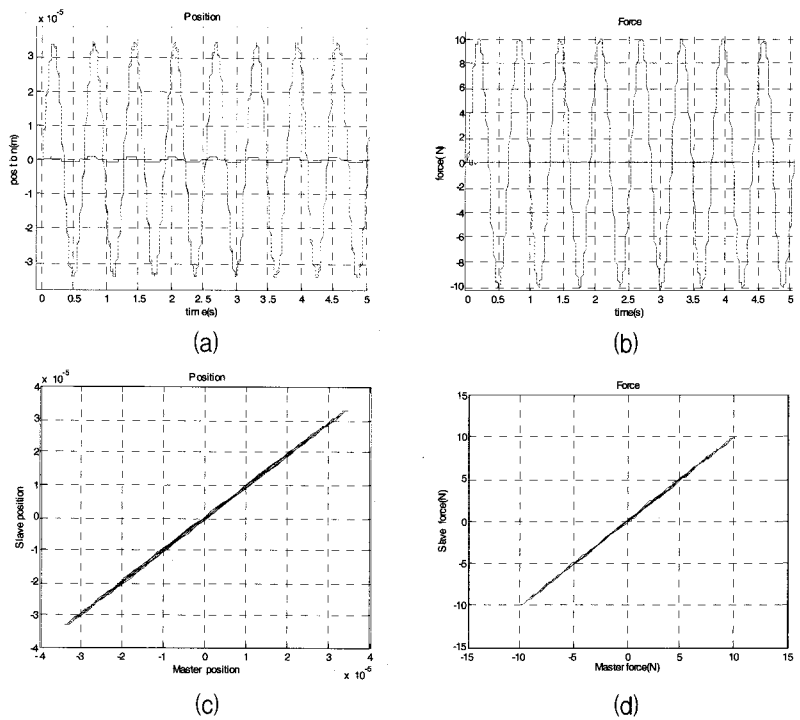
그림 5에서 1Hz의 정현파로 토지에 로봇이 접촉했을 때 조종기와 로봇의 1주기 당 0.48%의 위치오차가, 4.5%의 힘의 오차가 생성된다. 그림 7에서 지뢰에 1Hz의 정현파를 가했을 때의 주기 당 오차율을 비교해보면 힘은 6.7%, 위치는 1.7%를 보인다. 그림 5와 그림 7에서와 같이 입력 주기가 짧을 때 조종기와 로봇에서의 힘과 변위가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 6에서처럼 토지에 10Hz의 정현파 힘을 입력으로 조종기로 로봇이 지면에 닿도록 제어 했을 때 조종기와 로봇의 오차율은 힘이 5.2% 위치 1.1%로 거의 일치한다. 따라서 10Hz의 정현파 힘을 입력으로 조종기에 가하였을 때 그림 6에서 보는 것처럼 지면에 작업을 할 때 역시 사용자의 움직임을 추종하는 것을 볼 수 있다. 그림 8에서 10Hz 정현파의 힘을 조종기에 가하여 원격에서 로봇이 지뢰와 접촉하고 있을 때의 시뮬레이션 결과를 보면, 변위는 조종기의 움직임 대비 로봇의 움직임이 2.45%의 감소되어 움직임을 보이므로 거의 비슷한 변위의 움직임을 보인다. 또한 조종기 대비 로봇이 내는 힘의 크기는 76.52% 감소되어 사용자가 받는 힘이 로봇이 받는 힘보다 크게 설계되어졌음을 알 수 있다.

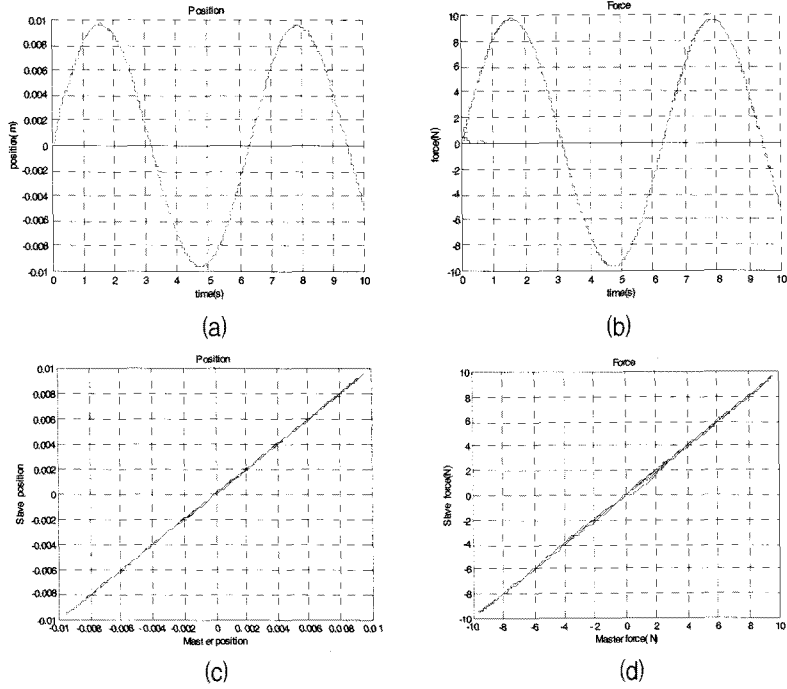
각 그림에서 알 수 있듯이, 각각의 제어 상수를 마



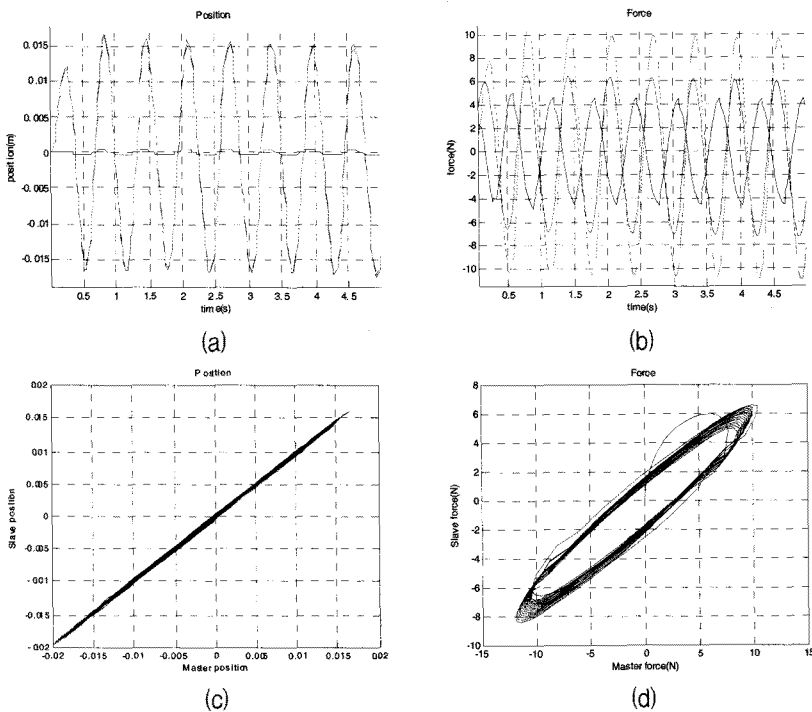
[그림 5] 1Hz의 정현파 입력을 토지에 가했을 때 힘과 변위의 입출력



[그림 6] 10Hz의 정현파 입력을 토지에 가했을 때 힘과 변위의 입출력



[그림 7] 1Hz의 정현파 입력을 지뢰에 가했을 때 힘과 변위의 입출력



[그림 8] 10Hz의 정현파 입력을 지뢰에 가했을 때 힘과 변위의 입출력

스터와 슬레이브를 각각 PID 콘트롤, 위치 정보 입력을 PI 콘트롤, 힘 정보를 P 콘트롤을 할 수 있도록 설정함으로써, 슬레이브와 마스터간의 정보를 주고 받았을 때 안정적인 제어를 할 수 있음을 알 수 있다.

이렇게 지뢰를 제거 할 시 지뢰에 로봇 틀이 닿았을 때 빠른 움직임으로 제어 시에 조종자에게 큰 반발력을 주어 작업을 어렵게 함과 동시에 지뢰 작업 시 생기는 빠른 동작의 경우 사용자의 힘을 지뢰에는 감소 시켜 전달하도록 설계 되어졌다. 이와 같이 텔레오퍼레이션 기법을 이용하여 로봇을 제어해서 지뢰를 제거 하는 경우 로봇이 땅에 접촉하는 부분과 지뢰에 접하는 부분에서 안전하게 힘과 변위를 제어할 수 있는 것을 알 수 있다.

4. 맺음말

지뢰제거와 같이 위험한 작업의 경우 원격으로 로봇 등을 제어하여 지뢰제거 작업을 할 수 있는 방법은 매우 유용하다. 본 연구에서 적용된 로봇 텔레오퍼레이션 기술을 이용한 지뢰제거는 원격에서 사용자가 조종기로 조종을 함으로써 로봇 팔이 조종기에서 내는 힘과 변위를 같거나, 증폭, 감소시킴으로써 제어할 수 있는 기법이다. 이를 통해 지뢰 제거 시 저주파 입력, 즉 느린 작업 시에는 똑같이 힘과 변위가 동일하게 추종할 수 있도록 하고, 빠른 작업 시에 지뢰가 닿을 경우 로봇이 받는 힘을 사용자에게 증폭을 시켜 주게 됨으로써 제약을 가지게 됨으로써 더욱 안정성을 높이면서 지뢰 제거 할 수 있도록 하였다.

본 논문의 연구 결과 주어진 특정 조건하에서 원격으로 로봇 팔을 이용하여 지뢰 제거 시, 로봇팔이 느끼는 힘을 조종기에서 받을 수 있고 조종기의 움직임을 로봇이 추종할 수 있도록 하여 지뢰 제거 시 유용성을 볼 수 있다.

본 논문에서 제시된 원격제어 기법을 이용한 지뢰 제거의 경우 국방 로봇 분야에 있어서 크게 기여할 것으로 판단된다. 실제 시스템인 로봇팔, 조종기, 지뢰, 토지 등의 정확한 제원과 시스템에 부합하는 제어기법을 이용하게 된다면 실제 지뢰 제거에도 유용하게 사용가능하다. 또한 영상 이미지와 함께 제어 기법을

같이 사용하게 되는 경우 그 효용성이 더 높아질 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. C. Georts, "Manipulator Systems Developed at ANL," In Proc. 12th Conference on Remote Systems Technology, pp. 117~136, 1964.
- [2] Bethea, B. T. et al., "Application of Haptic Feedback to Robotic Surgery", Journal of Laparoendoscopic and Advanced Surgical Techniques, Vol. 14 No. 3, pp. 191~195, 2004.
- [3] Konesky, G. A., "Large-scale Teleoperation Approach to the Exploration of the Hudson Submarine Canyon", Remote Sensing of the Ocean and Sea Ice, pp. 193~200, 2001.
- [4] Chacin, M., Rohmer, E., Mora, A., Yoshida, K., "A High Level Teleoperation Platform for Space Robotic Mission", Space Mission Challenges for Information Technology, pp. 133~139, 2006.
- [5] M. Ammi, H. Ladjal and A. Ferreria, "Evaluation of 3D Pseudo-Haptic Rendering using Vision for Cell Micromanipulation", IEEE /RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2115~2120, 2006.
- [6] Blake Hannaford, "A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback", IEEE Trans. on R&A Vol. 5, No. 4, 1989.
- [7] Yasuyoshi Yokokohji, "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling-Formulation and Experiment", IEEE Trans. on R&A Vol. 10, No. 5, pp. 605~620, 1994.
- [8] K. Hashttrudi-Zaad, S. E. Salcudean, "Adaptive Transparent Impedance Reflecting Teleoperation", Proceedings of the IEEE ICRA, pp. 1369~1374, 1996.
- [9] Ryu, Jee-Hwan, "Removing the Noisy Behavior

of the Time Domain Passivity Controller”,
Journal of Control, Automation and Systems
Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 380~388, 2006.

[10] Kawahara T, et al, “Noncontact Impedance
Sensing”, Artificial Life Robotics, Vol. 10,
pp. 35~40, 2006.